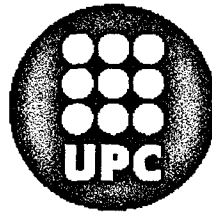


•1400342584

T 99/24



Biblioteca Rector Gabriel Ferraté  
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA



## **TESIS DOCTORAL**

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUNYA  
DEPARTAMENTO DE MECÁNICA DE FLUIDOS**

### **ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL PROCESO DE CALENTAMIENTO DE MEDIOS POROSOS SATURADOS HASTA EBULLICIÓN-“DRYOUT” DE SU FASE LÍQUIDA**

**Tesis doctoral presentada por: : MONTSERRAT CARBONELL VENTURA**

**DIRECTOR : Dr. LUIS VIRTO ALBERT**

**Vilanova i la Geltrú, 1999**

#### 4.3.6.- Presiones fluidoestáticas y de vapor en el medio poroso. Posición de la entrefase vapor-líquido subenfriado

Se ha de tener presente desde un principio que la determinación de la presión fluidoestática y la posición de la entrefase se ha llevado a cabo bajo el supuesto de que el desplazamiento de líquido en el MPS se lleva a cabo de modo uniforme, lo que no puede ser cierto, dada la no uniformidad espacial de la distribución de permeabilidad y de la distribución de radio capilar. Por consiguiente, los valores calculados para ambas magnitudes se entienden como medias espaciales (en el plano).

Por otra parte, las presiones de vapor medidas son locales, a distintas alturas en el medio poroso medidas desde el fondo (placa calefactora) y diferentes posiciones radiales (Tabla 4.1).

Las presiones fluidoestáticas calculadas representan la altura de líquido entre su superficie libre en la cubeta y la “superficie media de la entrefase vapor-líquido subenfriado en el MPS”; o bien la superficie de la placa calefactora si todavía no se ha formado vapor.

La presión fluidoestática correspondiente a las condiciones de equilibrio termodinámico cuasiestático se calcula así:

$$p_e = \langle \rho \rangle \cdot g \cdot H_l; \quad H_l = (H + h_c + h_{ev}) - h_{ef}$$

donde  $\langle \rho \rangle$  es la densidad media del líquido a lo largo de  $H_l$ ,  $H$  es la altura inicial del MPS,  $h_c$  es la altura de líquido en la cubeta,  $h_{ev}$  es la altura correspondiente a la capa de líquido evaporada en la cubeta y  $h_{ef}$  es la altura a la que se encuentra la entrefase.

El proceso de evaporación en la superficie de la cubeta, que aumenta a medida que el líquido contenido en ella eleva su temperatura, reduce la altura real de líquido en la cubeta, por lo que en el cálculo de la presión fluidoestática a lo largo del tiempo de calentamiento se ha llevado a cabo mediante la expresión:

$$p_e = \langle \rho \rangle \cdot g \cdot H_l; \quad H_l = (H + h_c) - h_{ef}$$

La altura a la que se encuentra la entrefase fue calculada como

$$h_{ef} = \frac{(V_c + V_{ev}) - V_d}{\frac{\pi}{4} d^2 \cdot \varepsilon}$$

donde  $V_c$  es el aumento de volumen medido en la cubeta (en el instante en que deseamos calcular la presión fluidoestática) respecto al volumen inicial en la misma,  $V_{ev}$  es el volumen de líquido evaporado,  $V_d$  es el aumento de volumen de saturación del medio poroso por dilatación térmica del MPS;  $d$  es el diámetro de la sección recta del MPS y  $\varepsilon$  es su porosidad geométrica.

En la figuras 4.67 a 4.78 se muestran las gráficas de presión fluidoestática (Pa) y altura de la interfase (m) versus el tiempo transcurrido a partir del inicio de la experiencia.

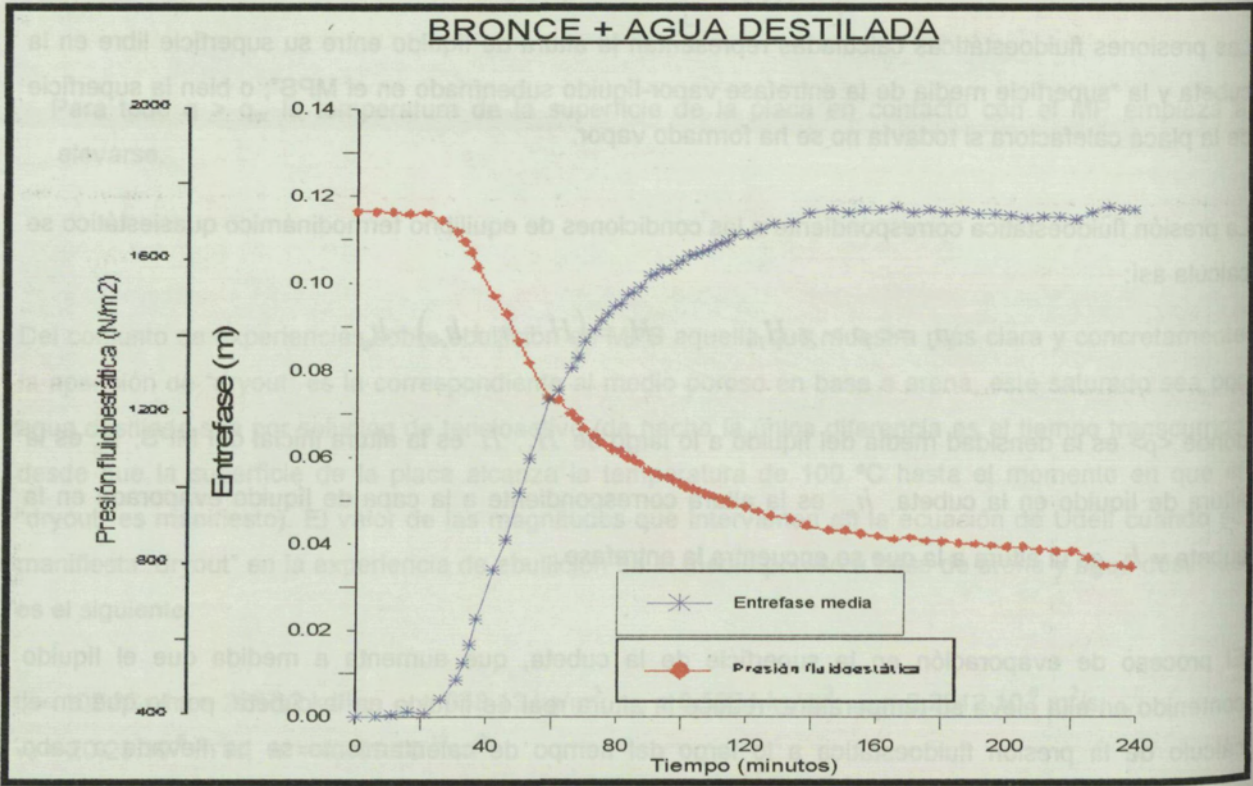


Figura 4.67.- Variación temporal de la presión fluidoestática (Pa) y altura media de la interfase (m).



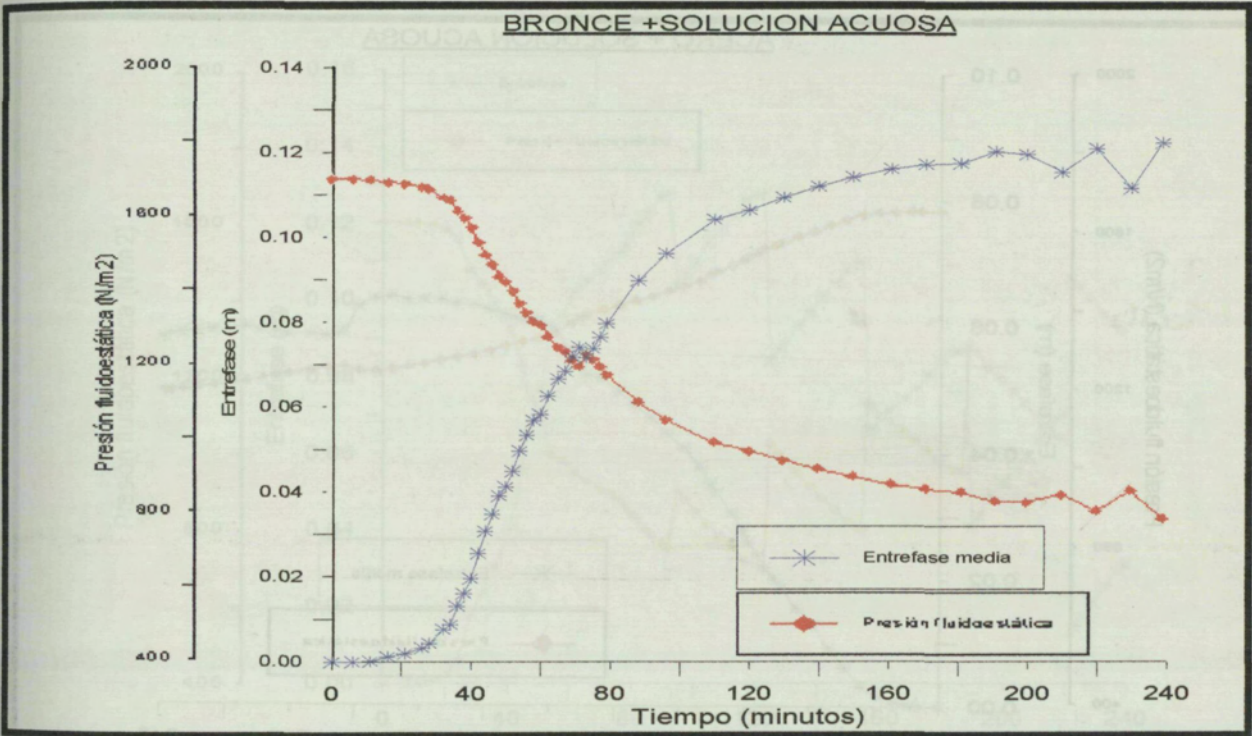


Figura 4.68.- Variación temporal de la presión fluidoestática (Pa) y altura media de la entrefase (m).

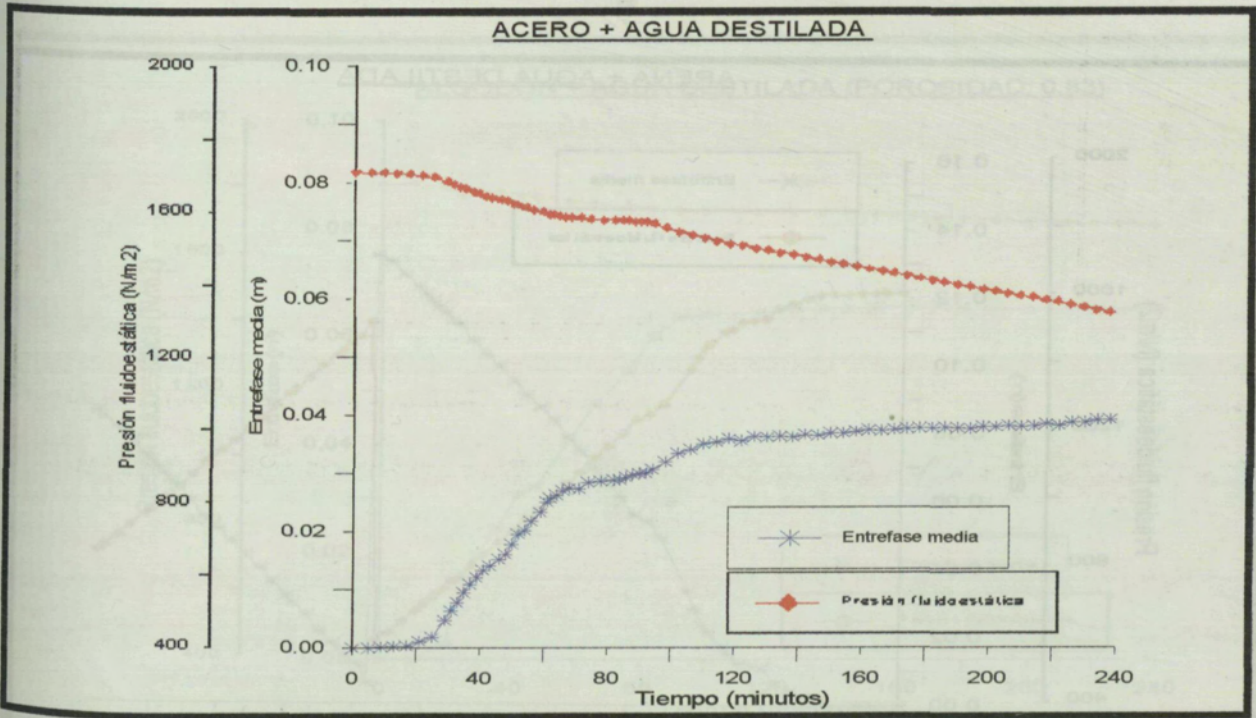


Figura 4.69.- Variación temporal de la presión fluidoestática (Pa) y altura media de la entrefase (m).



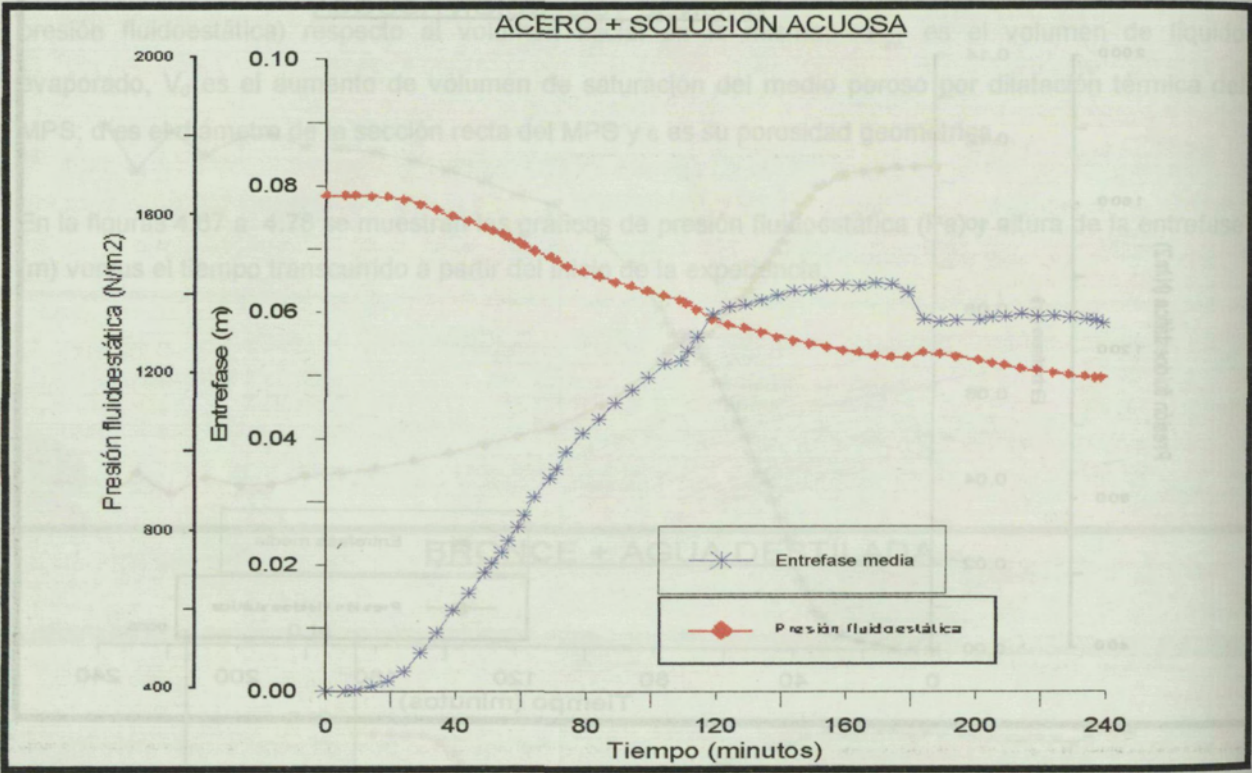


Figura 4.70.- Variación temporal de la presión fluidoestática (Pa) y altura media de la entrefase (m).

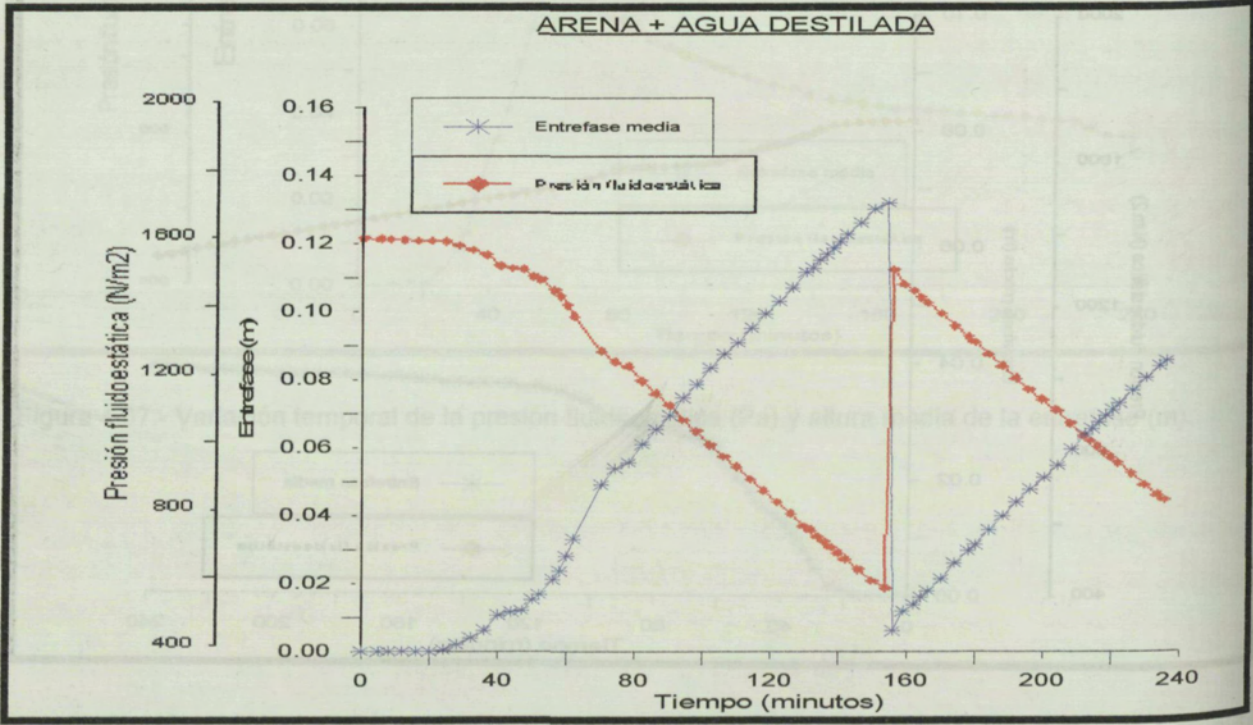


Figura 4.71.- Variación temporal de la presión fluidoestática (Pa) y altura media de la entrefase (m).



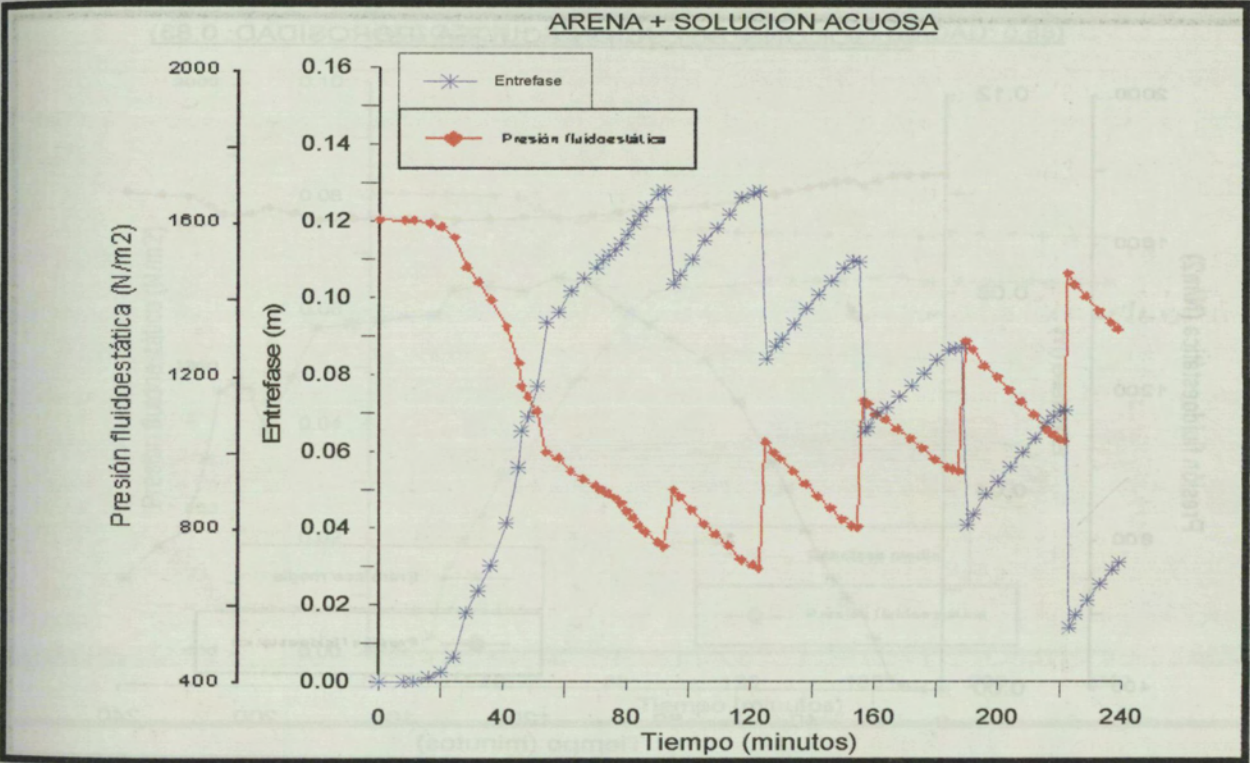


Figura 4.72.- Variación temporal de la presión fluidoestática (Pa) y altura media de la entrefase (m).

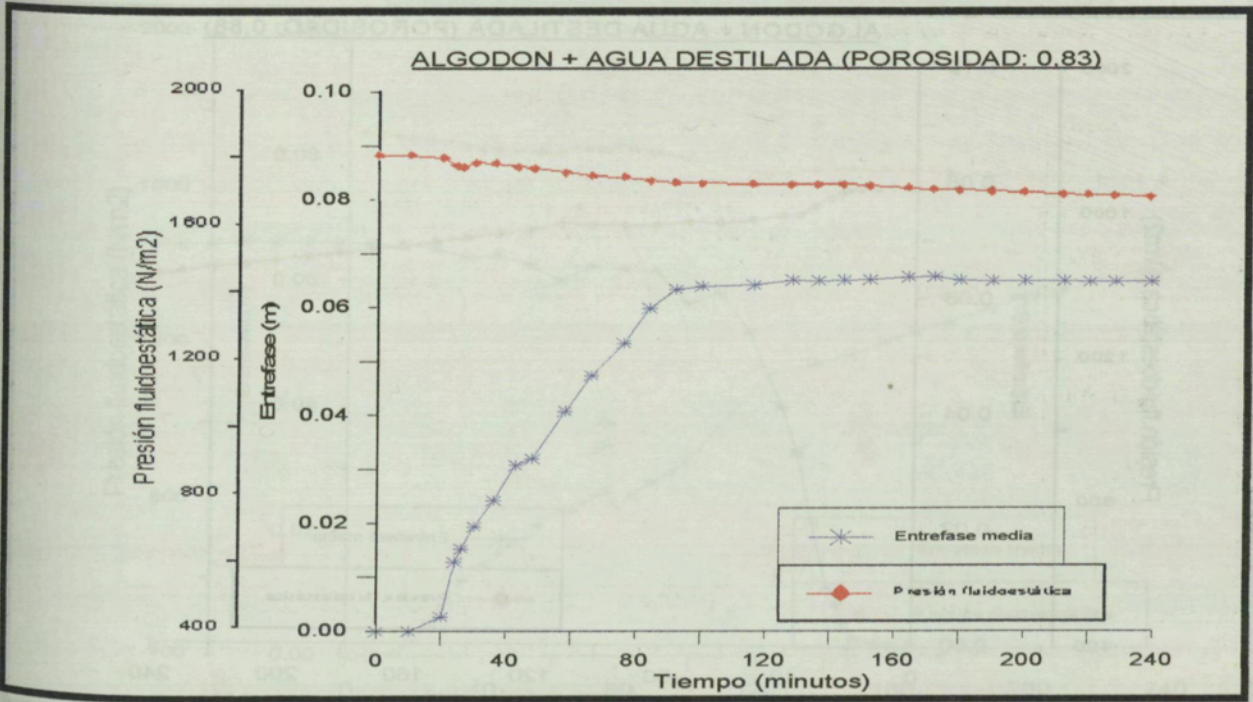


Figura 4.73.- Variación temporal de la presión fluidoestática (Pa) y altura media de la entrefase (m).



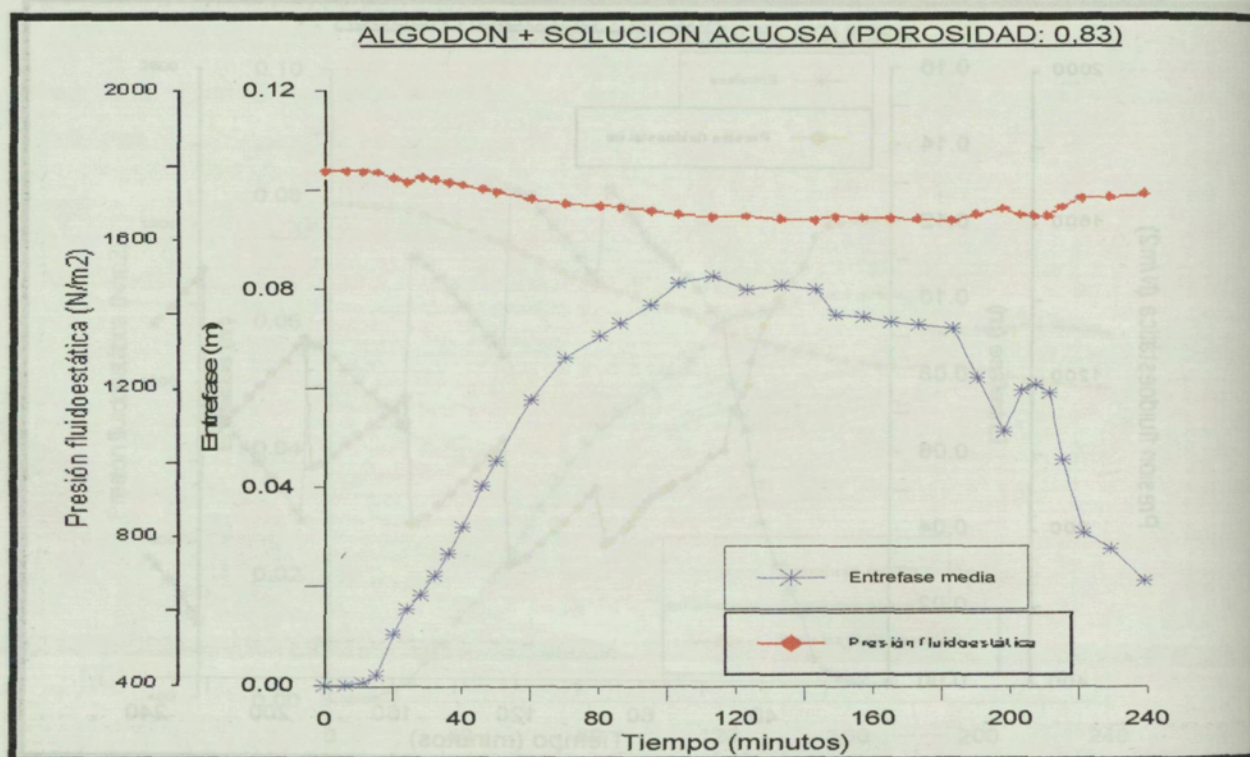


Figura 4.74.- Variación temporal de la presión fluidoestática (Pa) y altura media de la interfase (m).

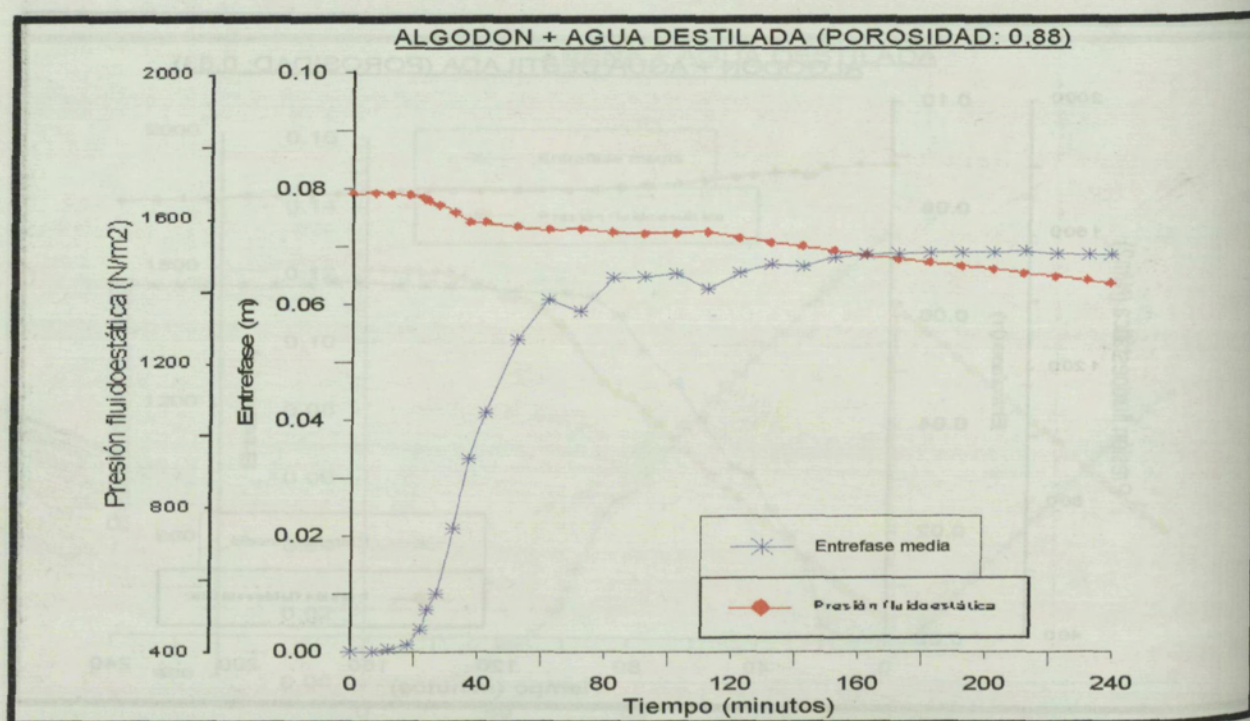


Figura 4.75.- Variación temporal de la presión fluidoestática (Pa) y altura media de la interfase (m).



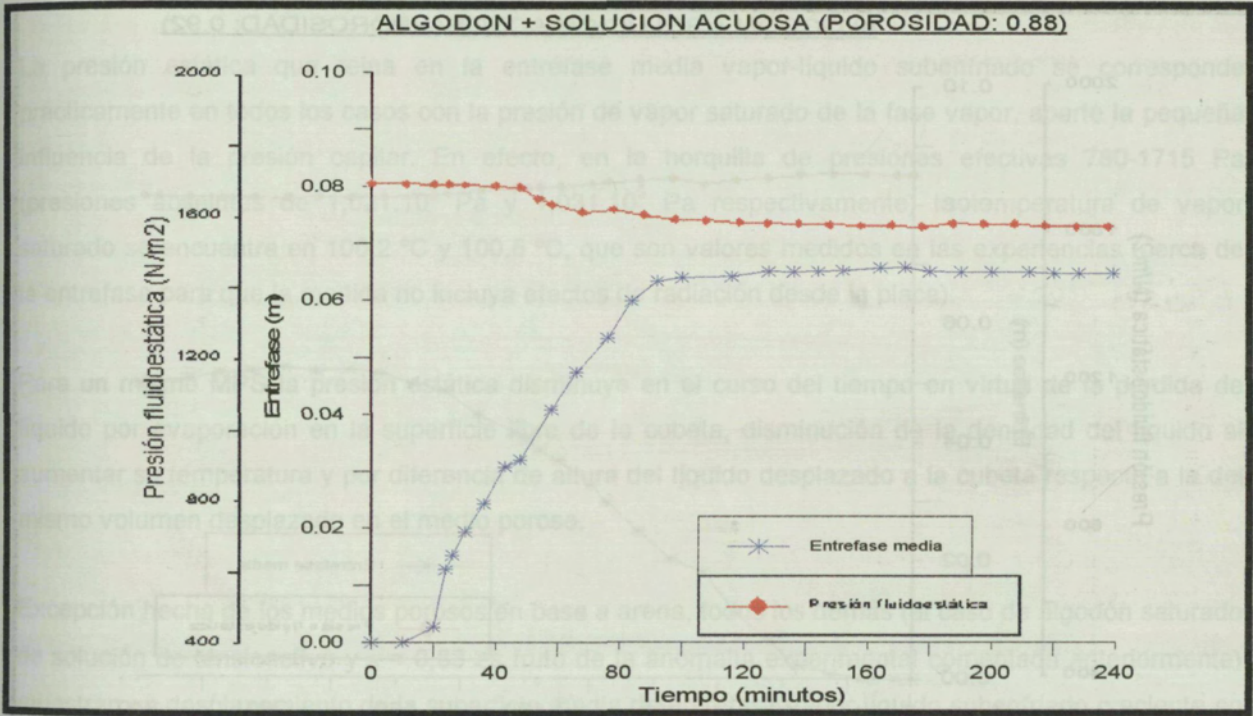


Figura 4.76.- Variación temporal de la presión fluidoestática (Pa) y altura media de la entrefase (m).

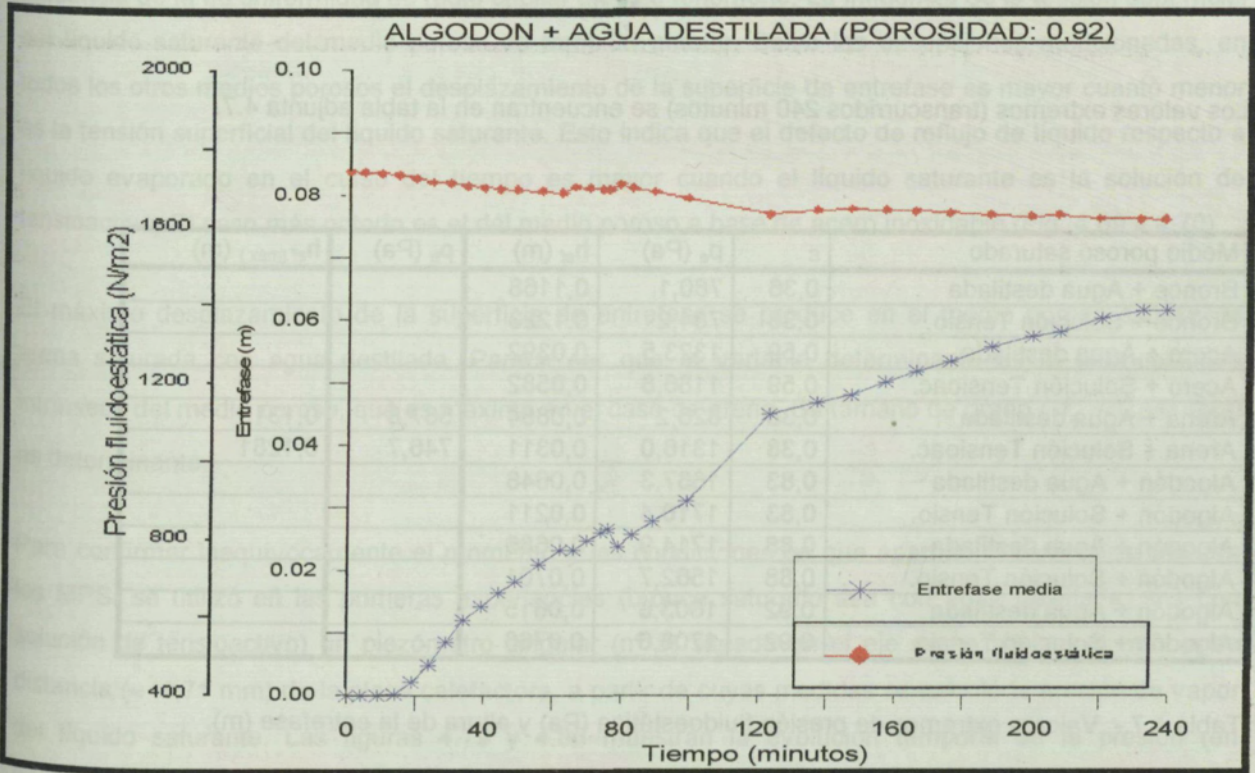


Figura 4.77.- Variación temporal de la presión fluidoestática (Pa) y altura media de la entrefase (m).



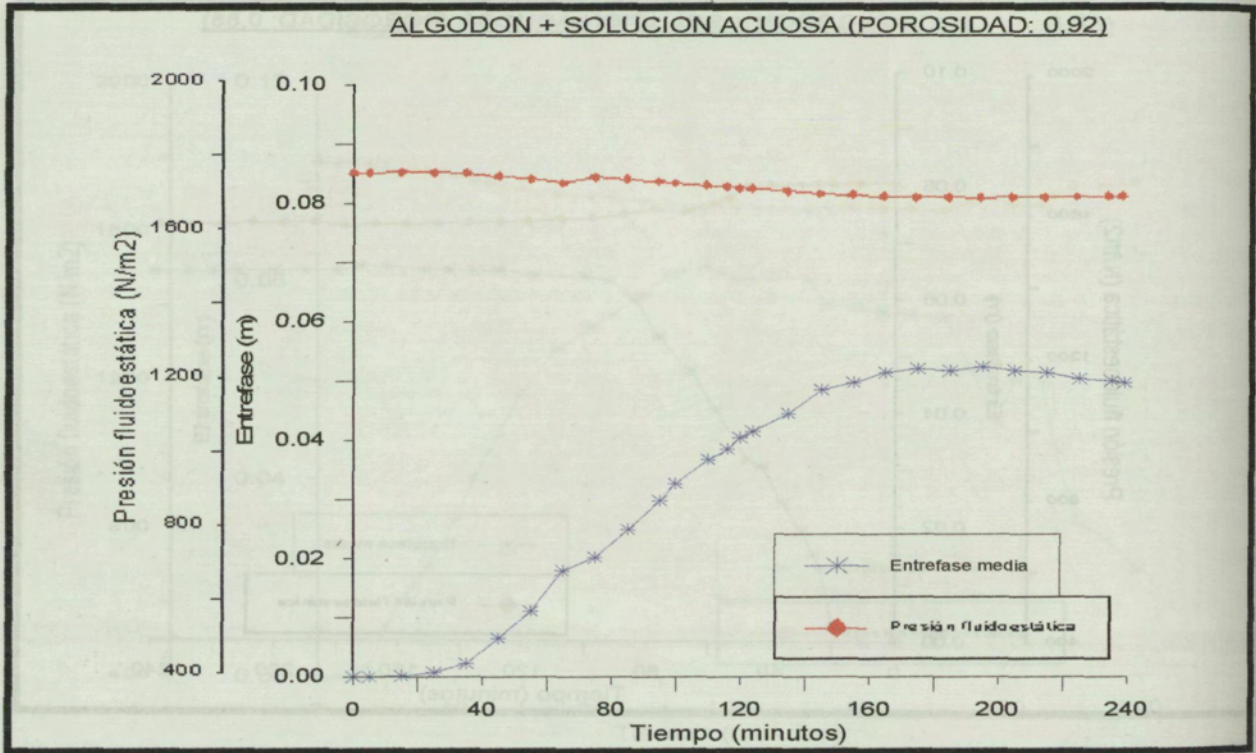


Figura 4.78.- Variación temporal de la presión fluidoestática (Pa) y altura media de la entrefase (m).

Los valores extremos (transcurridos 240 minutos) se encuentran en la tabla adjunta 4.7.

Medio poroso saturado	$\varepsilon$	$p_e$ (Pa)	$h_{ef}$ (m)	$p_e$ (Pa)	$h_{ef} (máx.)$ (m)
Bronce + Agua destilada	0,36	780,1	0,1168		
Bronce + Solución Tensio.	0,36	784,2	0,1223		
Acero + Agua destilada	0,59	1323,5	0,0392		
Acero + Solución Tensioac.	0,59	1186,8	0,0582		
Arena + Agua destilada	0,38	826,2	0,0854	567,8	0,1319
Arena + Solución Tensioac.	0,38	1316,0	0,0311	746,7	0,1281
Algodón + Agua destilada	0,83	1667,3	0,0648		
Algodón + Solución Tensio.	0,83	1710,4	0,0211		
Algodón + Agua destilada	0,88	1714,9	0,0686		
Algodón + Solución Tensio.	0,88	1562,7	0,0701		
Algodón + Agua destilada	0,92	1603,6	0,0615		
Algodón + Solución Tensio.	0,92	1708,6	0,0766		

Tabla 4.7.- Valores extremos de presión fluidoestática (Pa) y altura de la entrefase (m).

A la vista de los resultados obtenidos cabe hacer los comentarios siguientes:

La presión estática que reina en la interfase media vapor-líquido subenfriado se corresponde prácticamente en todos los casos con la presión de vapor saturado de la fase vapor, aparte la pequeña influencia de la presión capilar. En efecto, en la horquilla de presiones efectivas 780-1715 Pa (presiones absolutas de  $1,021 \cdot 10^5$  Pa y  $1,031 \cdot 10^5$  Pa respectivamente) la temperatura de vapor saturado se encuentra en 100,2 °C y 100,5 °C, que son valores medidos en las experiencias (cerca de la interfase para que la medida no incluya efectos de radiación desde la placa).

Para un mismo MPS la presión estática disminuye en el curso del tiempo en virtud de la pérdida de líquido por evaporación en la superficie libre de la cubeta, disminución de la densidad del líquido al aumentar su temperatura y por diferencia de altura del líquido desplazado a la cubeta respecto a la del mismo volumen desplazado en el medio poroso.

Excepción hecha de los medios porosos en base a arena, todos los demás (el caso de algodón saturado de solución de tensioactivo y  $\varepsilon = 0,83$  es fruto de la anomalía experimental comentada anteriormente) muestran un desplazamiento de la superficie media de interfase vapor-líquido subenfriado creciente en el curso del tiempo. Tan pronto como se inicia el cambio de fase la interfase constituida se desplaza, al principio muy rápidamente para después tender a cero, una vez alcanzado el equilibrio entre flujo másico de líquido evaporado-flujo másico restituido por capilaridad, esencialmente. Resulta evidente la influencia de la no uniformidad de radio capilar en este fenómeno. La influencia de la tensión superficial del líquido saturante del medio poroso es también notoria. Salvo las excepciones mencionadas, en todos los otros medios porosos el desplazamiento de la superficie de interfase es mayor cuanto menor es la tensión superficial del líquido saturante. Esto indica que el defecto de reflujo de líquido respecto a líquido evaporado en el curso del tiempo es mayor cuando el líquido saturante es la solución de tensioactivo. El caso más notorio es el del medio poroso a base de acero inoxidable (Fig. 4.69 y 4.70)

El máximo desplazamiento de la superficie de interfase se produce en el medio poroso a base de arena saturada con agua destilada. Parece ser que la variable determinante es la permeabilidad intrínseca del medio poroso, que es máxima en el caso de arena. Su tamaño de grano ( $d_m \approx 2,96$  mm) es determinante.

Para confirmar inequívocamente el momento y las condiciones en que aparece el cambio de fase en los MPS, se utilizó en las primeras experiencias (bronce saturado sea con agua destilada, sea con solución de tensioactivo) un piezómetro singular (nº 5) situado en el eje de la célula y a muy poca distancia ( $\approx 4,71$  mm) de la placa calefactora, a partir de cuyas medidas se calculó la presión de vapor del líquido saturante. Las figuras 4.79 y 4.80 muestran la evolución temporal de la presión (en cm.c.agua) en diferentes puntos del MPS (piezómetros 1 a 5) para los medios porosos en base a bronce saturado con agua destilada y con solución de tensioactivo. A la vista de las gráficas cabe



concluir que en ambos medios la presión empieza a elevarse a partir de los 30 minutos, lo que coincide con el momento en que la temperatura de la superficie de la placa calefactora en contacto con el medio poroso alcanza los 100 °C.

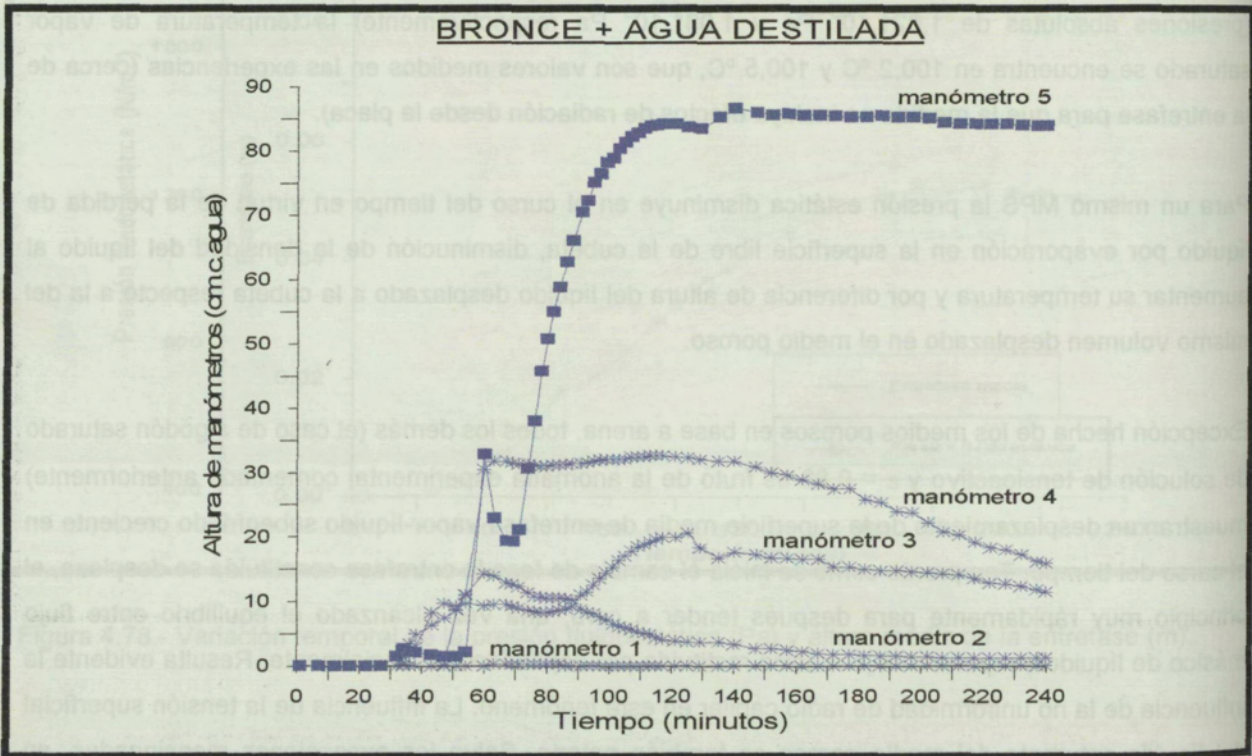


Figura 4.79.- Evolución temporal de la presión (en cm.c.agua) en diferentes puntos del medio poroso a base de partículas de bronce, con agua destilada como fluido saturante.

Se constata también que en términos generales la presión de vapor del fluido disminuye a medida que la distancia desde el punto de medida a la placa calefactora aumenta. Observamos, no obstante, dos anomalías que se han de atribuir a causas experimentales. La primera es que en el medio poroso de bronce saturado por solución de tensioactivo el piezómetro nº 5 detecta menos presión que el nº 4, en contra de la respuesta normal (bronce saturado por agua destilada) lo que cabe atribuirlo a obturación del orificio de entrada al piezómetro por el polvo de bronce. Ello llevó a prescindir de este piezómetro en todas las otras experiencias. La segunda anomalía se manifiesta por un incremento rápido de la presión en un piezómetro que hasta aquel momento había detectado presión constante durante un gran intervalo de tiempo (piezómetro nº 2, Fig. 4.80), lo cual sólo puede explicarse por transporte convectivo de calor en ese instante en el dominio entorno del orificio de dicho piezómetro.



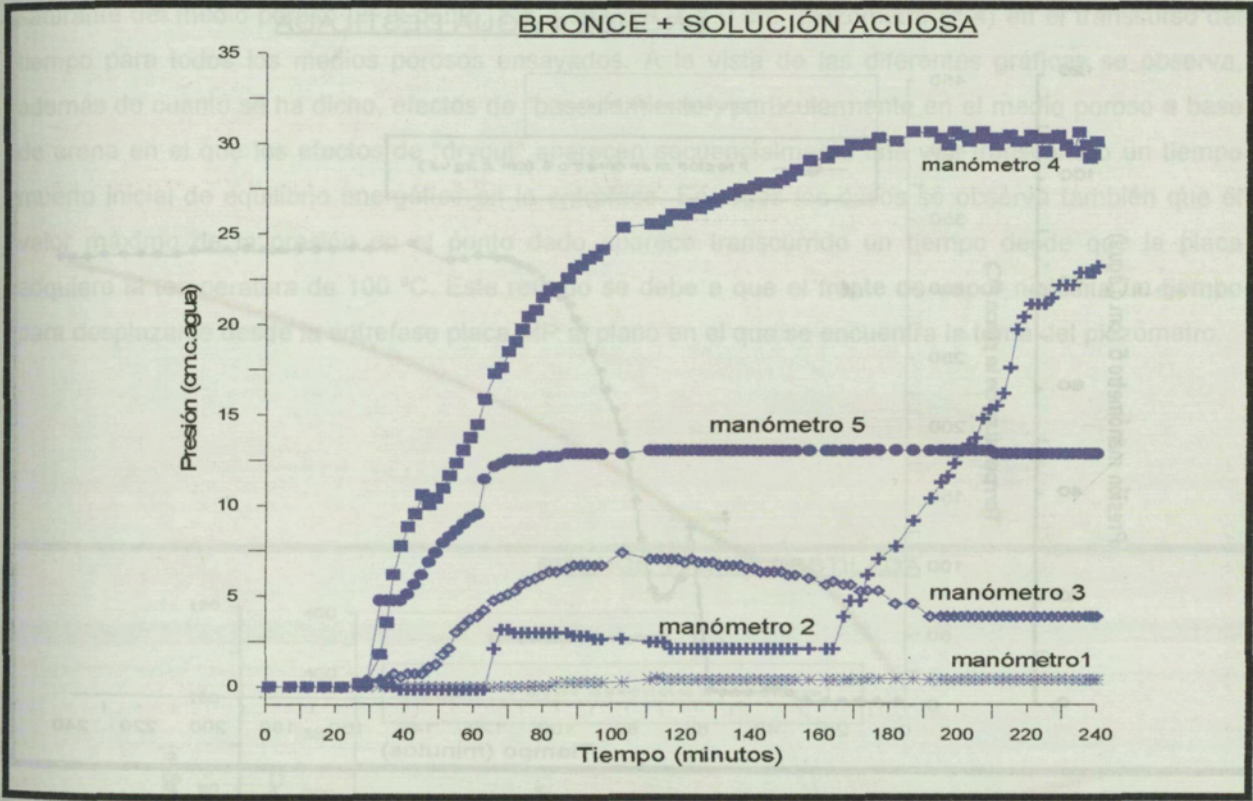


Figura 4.80.- Evolución temporal de la presión (en cm.c.agua) en diferentes puntos del medio poroso a base de partículas de bronce, con solución de tensioactivo como fluido saturante.

Las figuras 4.81 y 4.82 muestran (aparte una inestabilidad temporal en el medio poroso a base de bronce y agua destilada) la correlación que existe entre evolución de la presión de vapor en el fluido y de la temperatura de la placa hasta que el medio poroso alcanza el estado de cuasi-equilibrio energético en la entrefase.



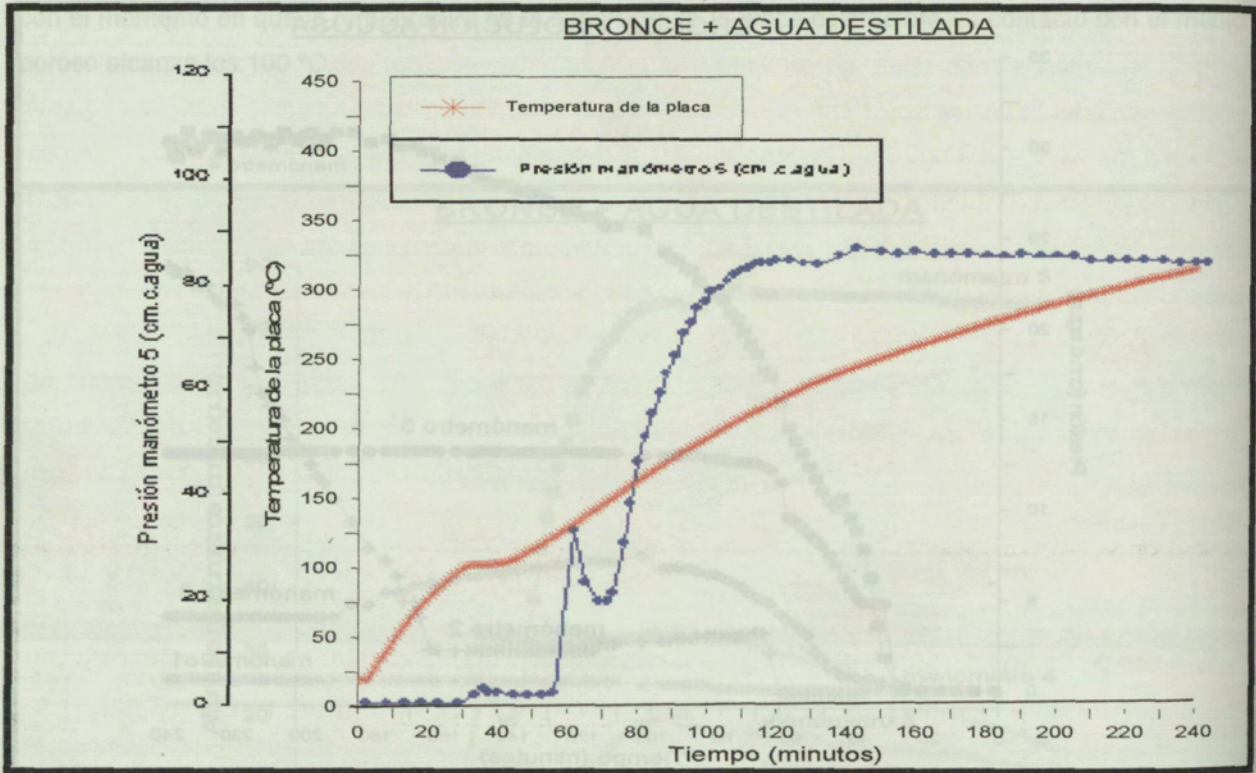


Figura 4.81.- Variación temporal de la presión de vapor en el fluido y de la temperatura de la placa.

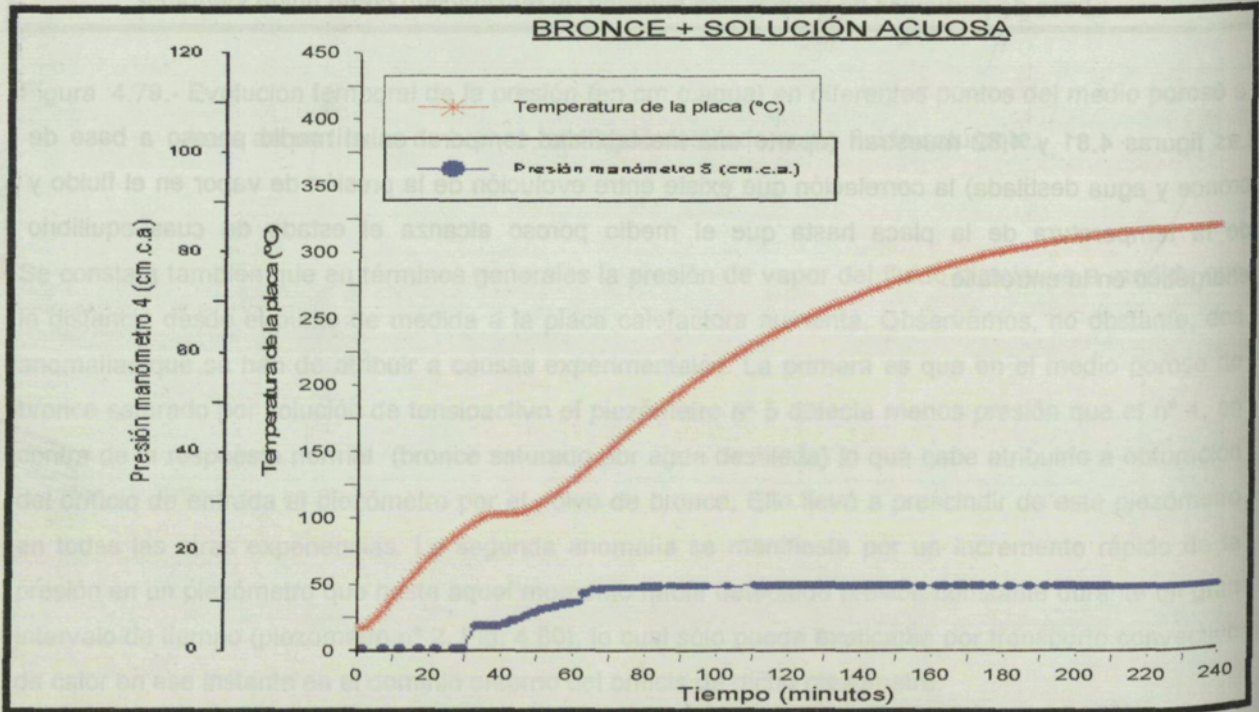


Figura 4.82.- Variación temporal de la presión de vapor en el fluido y de la temperatura de la placa.



Las figuras 4.83 a 4.94 muestran la evolución de la temperatura de la placa y la presión del fluido saturante del medio poroso en el punto,  $z = 3,364\text{ cm}$ ,  $r = 0\text{ cm}$  (piezómetro nº 4) en el transcurso del tiempo para todos los medios porosos ensayados. A la vista de las diferentes gráficas se observa, además de cuanto se ha dicho, efectos de “basculamiento”, particularmente en el medio poroso a base de arena en el que los efectos de “dryout” aparecen secuencialmente una vez transcurrido un tiempo muerto inicial de equilibrio energético en la interfase. En todos los casos se observa también que el valor máximo de la presión en el punto dado aparece transcurrido un tiempo desde que la placa adquiere la temperatura de  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Este retardo se debe a que el frente de vapor necesita un tiempo para desplazarse desde la interfase placa-MP al plano en el que se encuentra la toma del piezómetro.

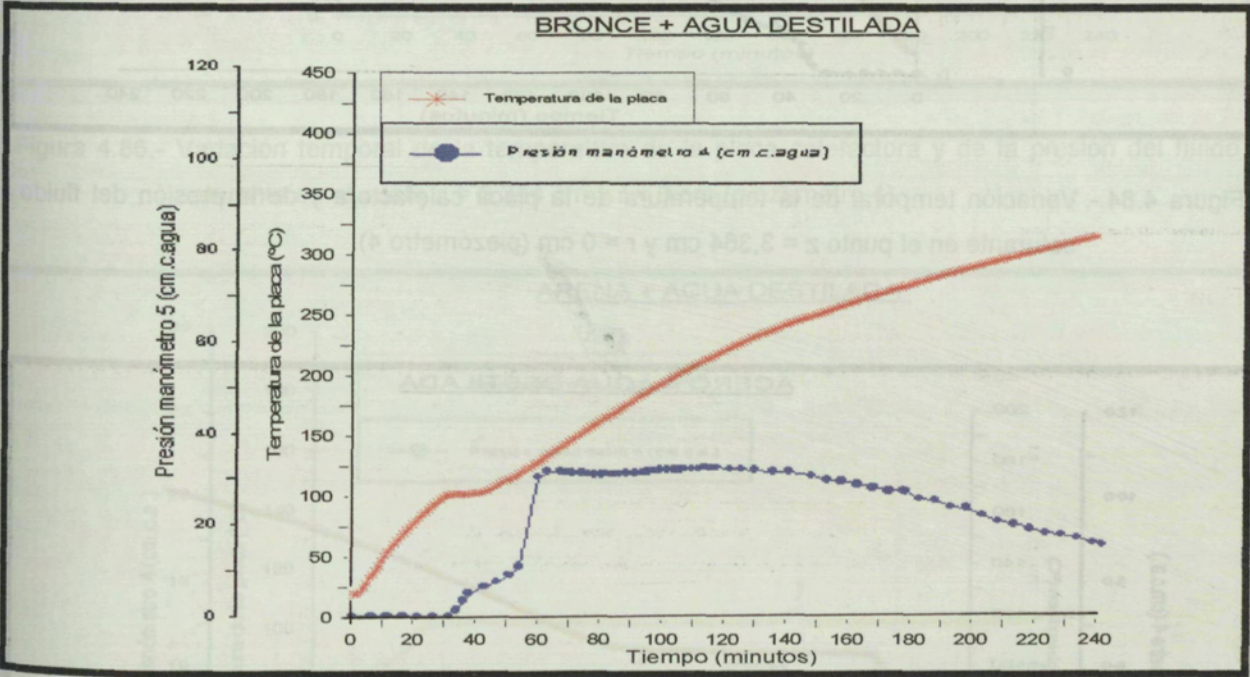


Figura 4.83.- Variación temporal de la temperatura de la placa calefactora y de la presión del fluido saturante en el punto  $z = 3,364\text{ cm}$  y  $r = 0\text{ cm}$  (piezómetro 4).



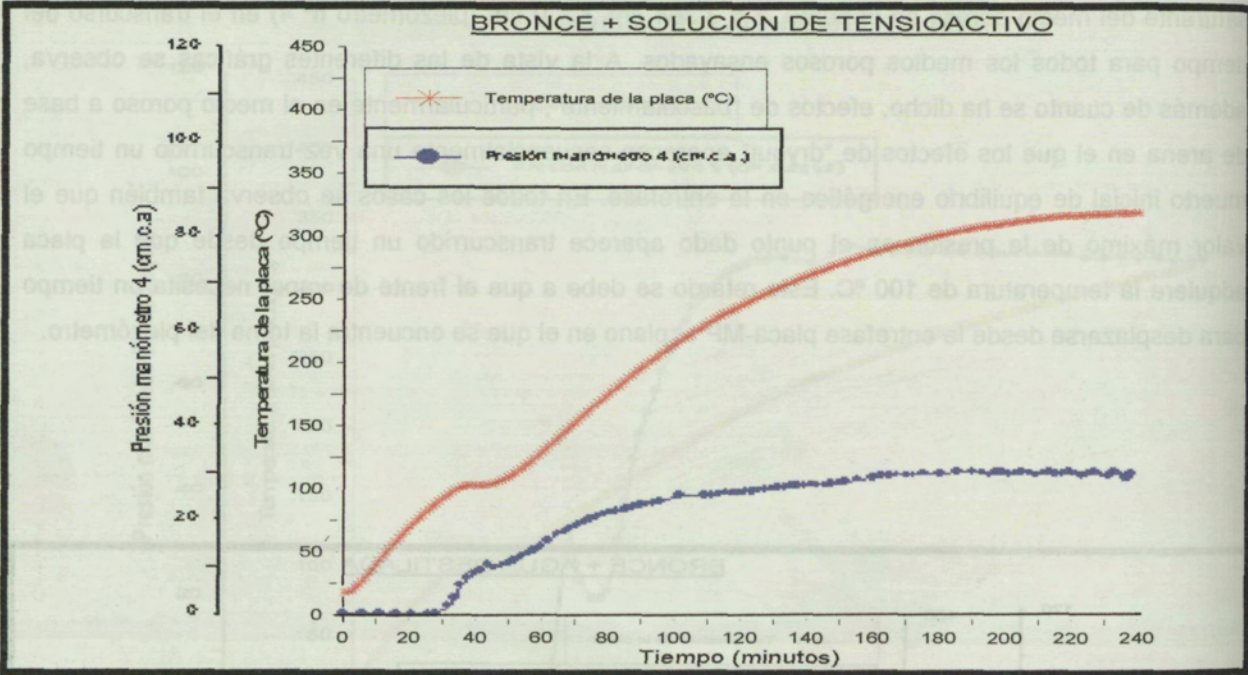


Figura 4.84.- Variación temporal de la temperatura de la placa calefactora y de la presión del fluido saturante en el punto  $z = 3,364$  cm y  $r = 0$  cm (piezómetro 4).

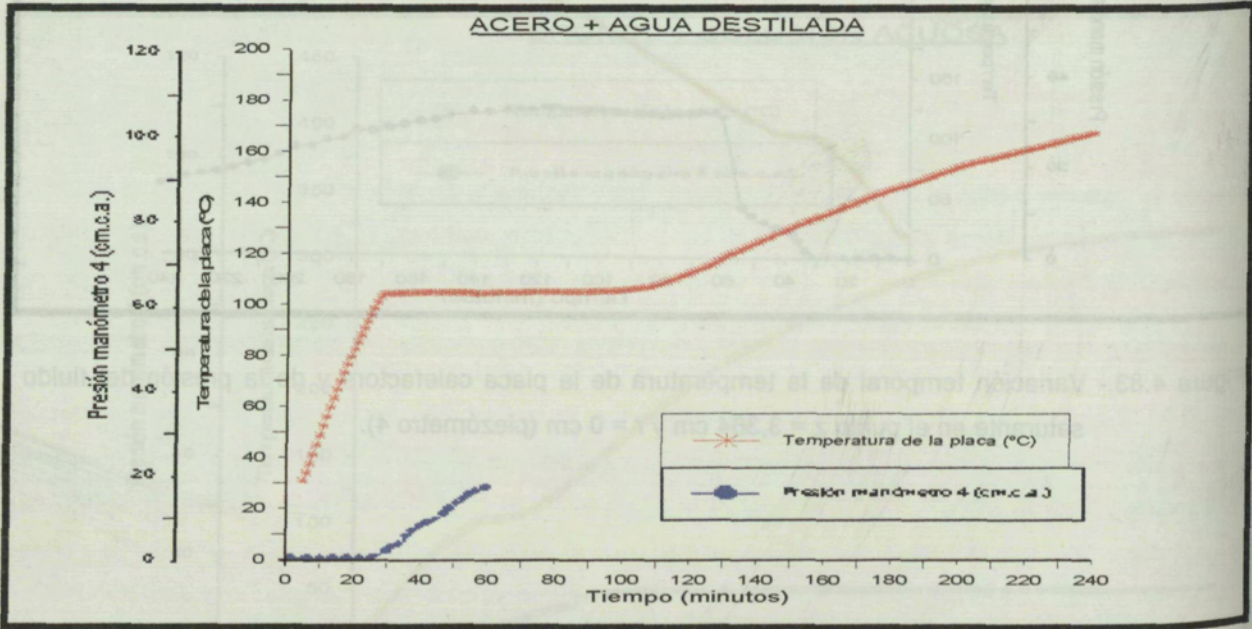


Figura 4.85.- Variación temporal de la temperatura de la placa calefactora y de la presión del fluido saturante en el punto  $z = 3,364$  cm y  $r = 0$  cm (piezómetro 4).



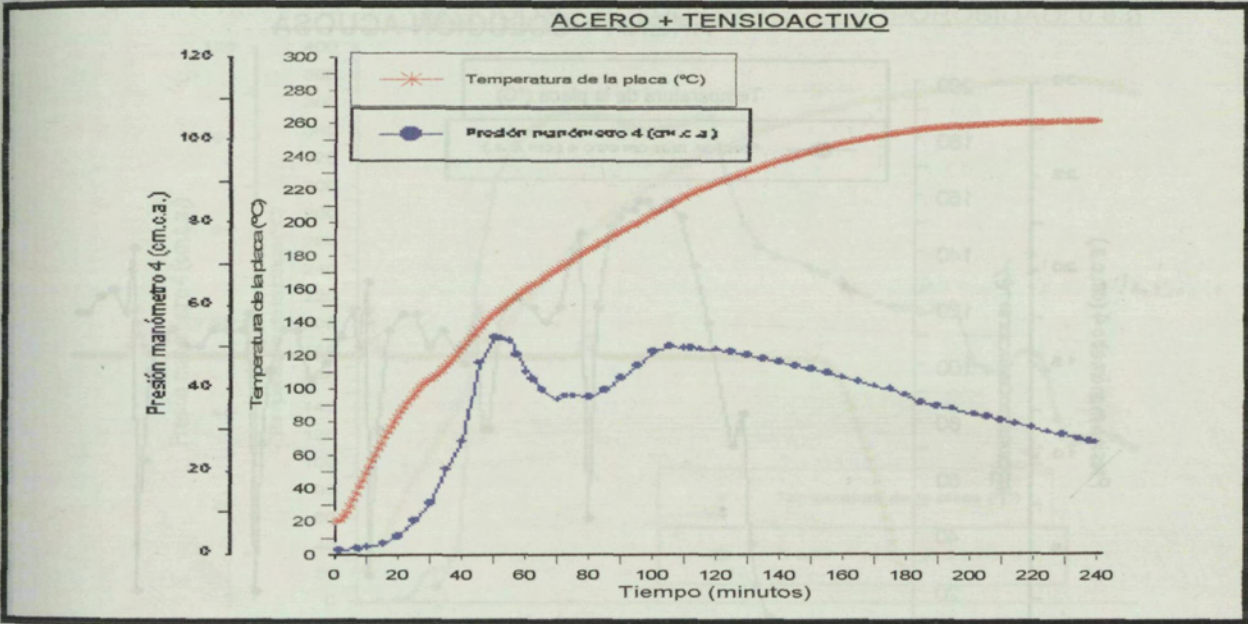


Figura 4.86.- Variación temporal de la temperatura de la placa calefactora y de la presión del fluido saturante en el punto  $z = 3,364$  cm y  $r = 0$  cm (piezómetro 4).

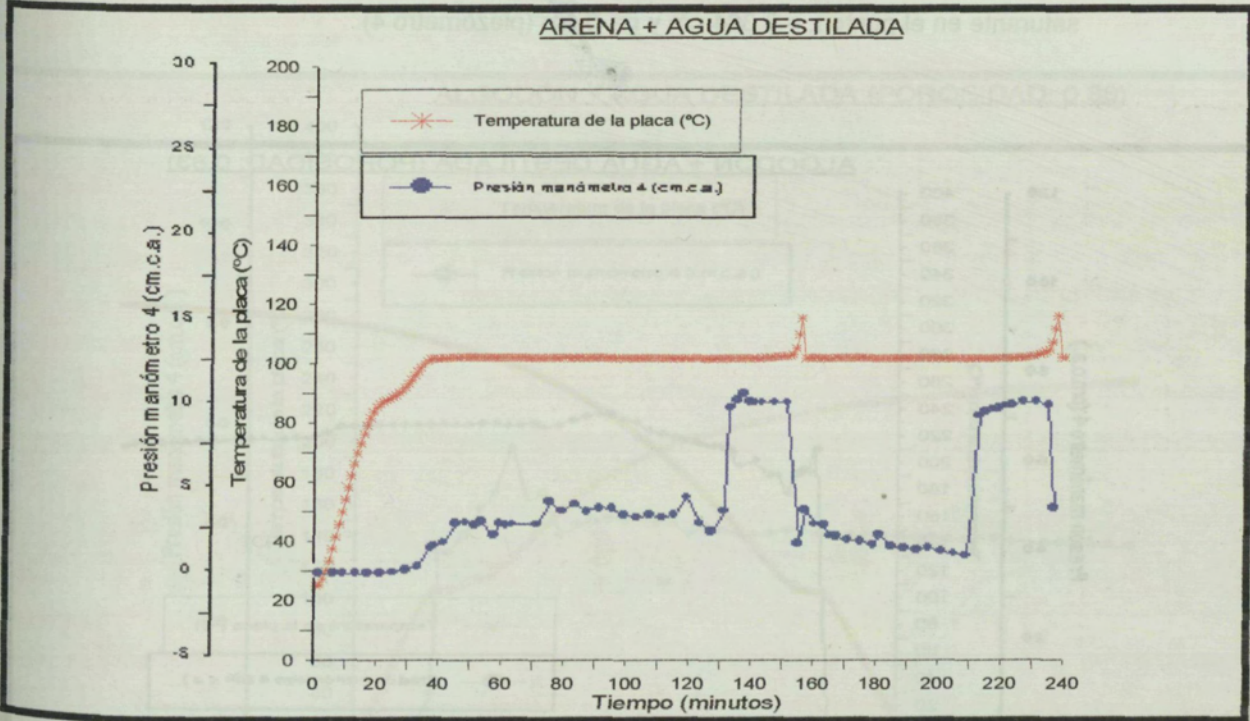


Figura 4.87.- Variación temporal de la temperatura de la placa calefactora y de la presión del fluido saturante en el punto  $z = 3,364$  cm y  $r = 0$  cm (piezómetro 4).



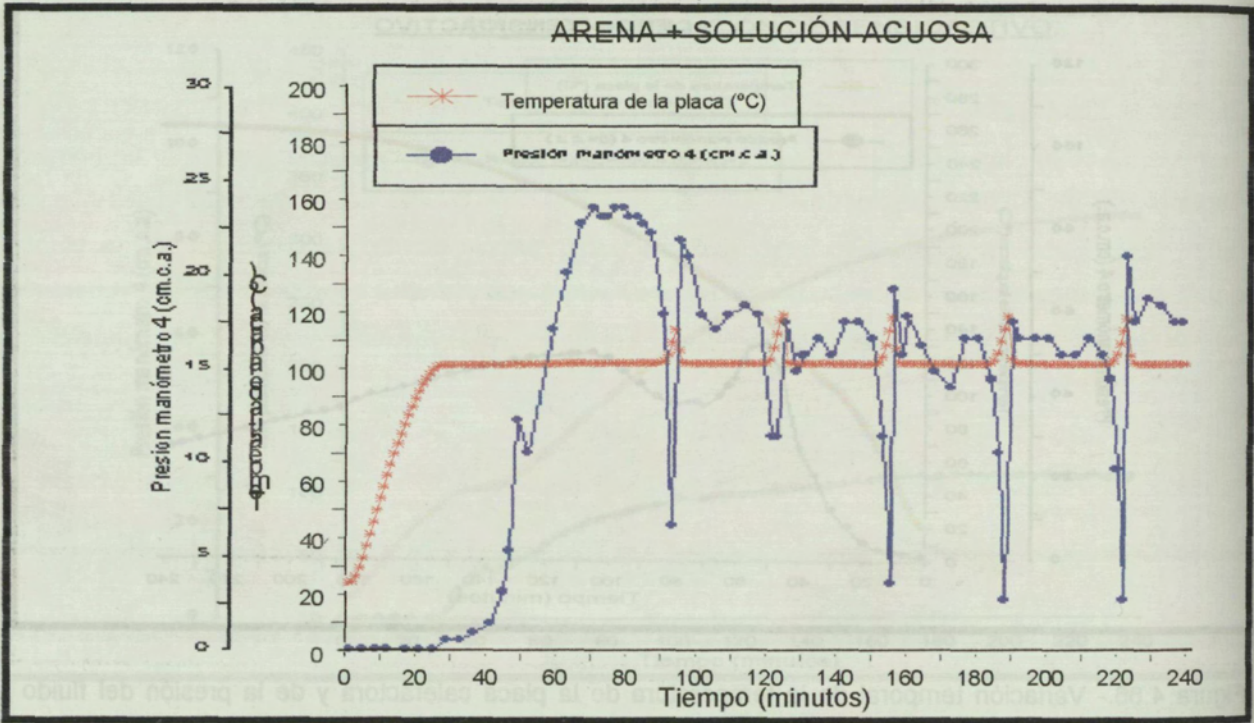


Figura 4.88.- Variación temporal de la temperatura de la placa calefactora y de la presión del fluido saturante en el punto  $z = 3,364$  cm y  $r = 0$  cm (piezómetro 4).

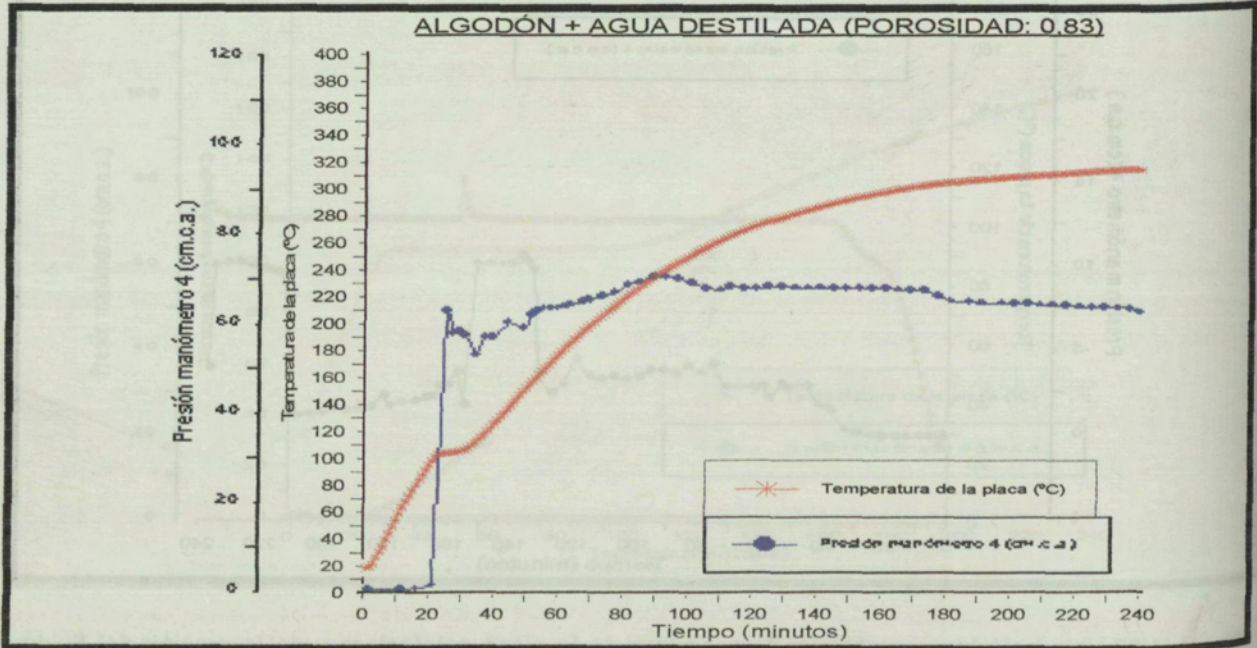


Figura 4.89.- Variación temporal de la temperatura de la placa calefactora y de la presión del fluido saturante en el punto  $z = 3,364$  cm y  $r = 0$  cm (piezómetro 4).



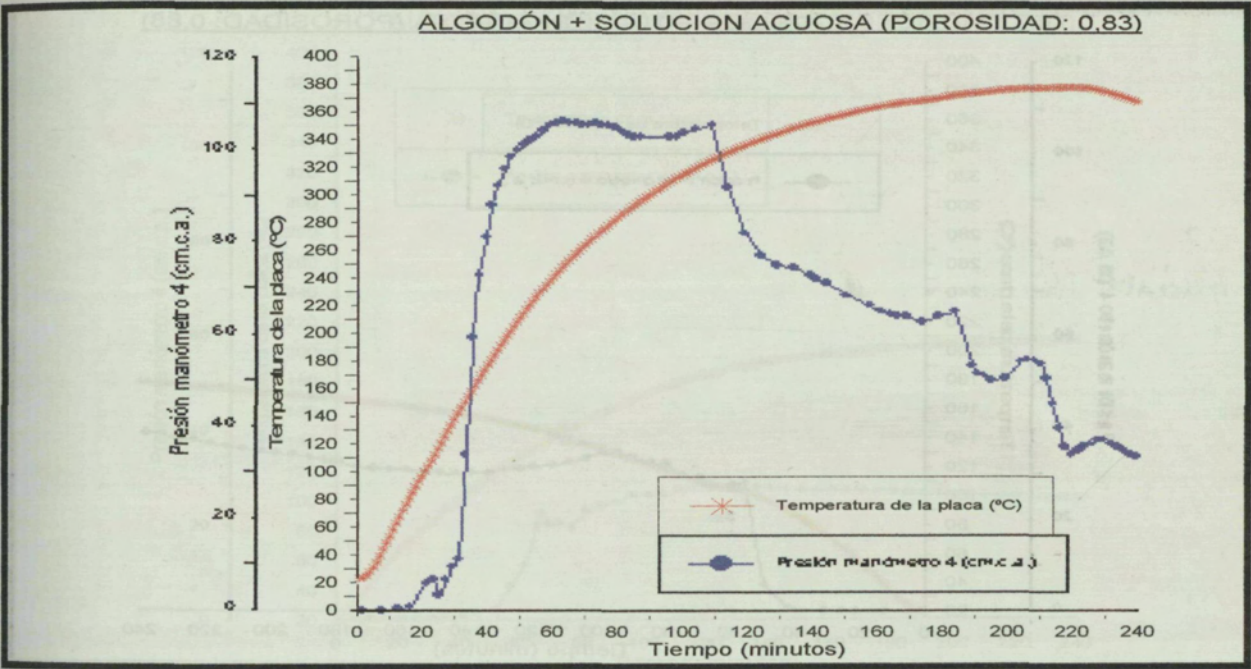


Figura 4.90.- Variación temporal de la temperatura de la placa calefactora y de la presión del fluido saturante en el punto  $z = 3,364$  cm y  $r = 0$  cm (piezómetro 4).

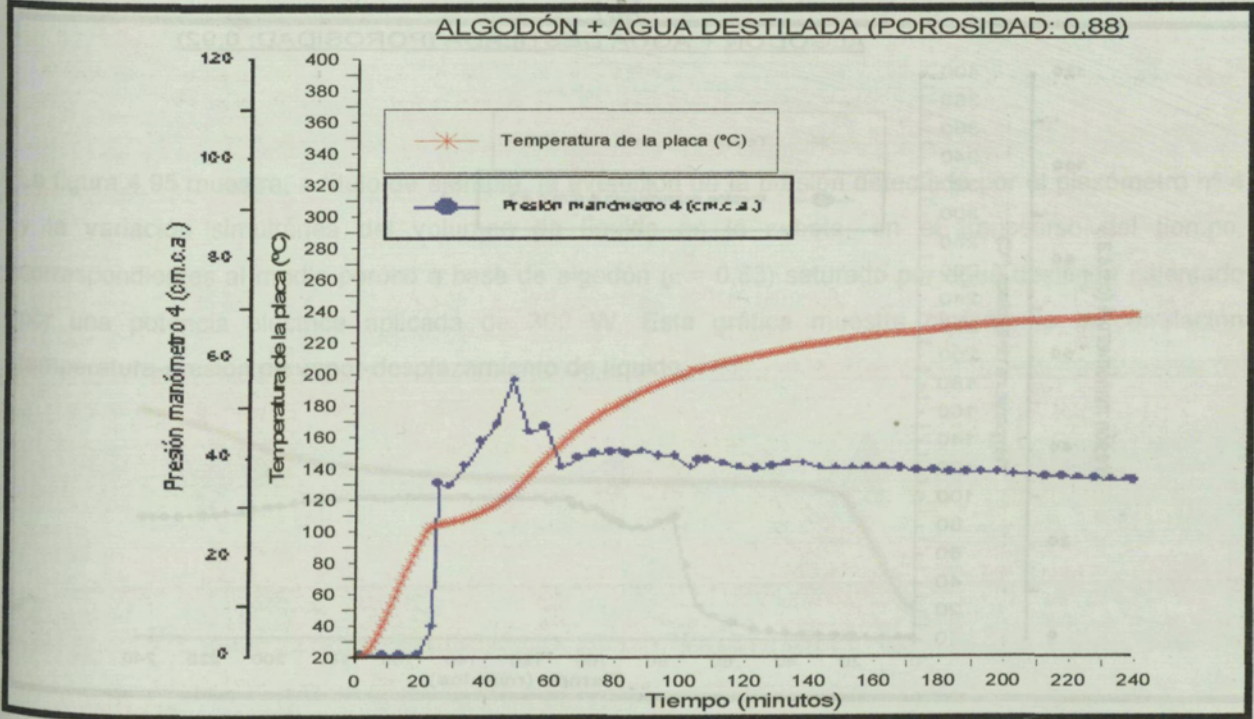


Figura 4.91.- Variación temporal de la temperatura de la placa calefactora y de la presión del fluido saturante en el punto  $z = 3,364$  cm y  $r = 0$  cm (piezómetro 4).



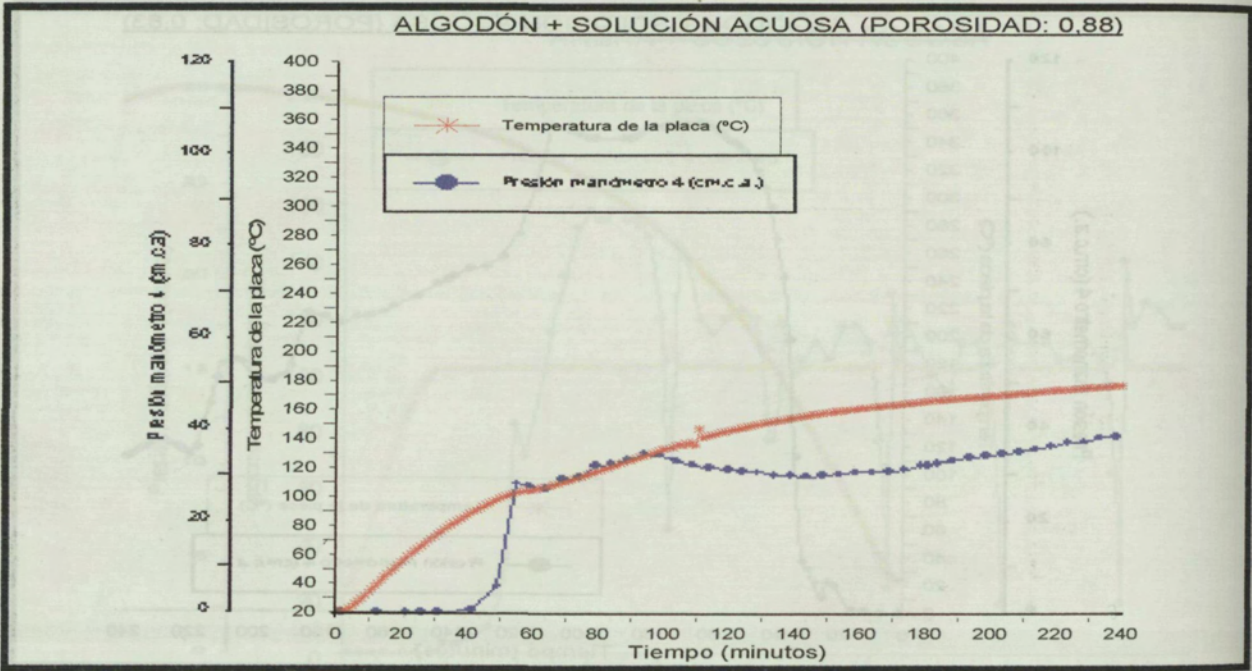


Figura 4.92.- Variación temporal de la temperatura de la placa calefactora y de la presión del fluido saturante en el punto  $z = 3,364$  cm y  $r = 0$  cm (piezómetro 4).

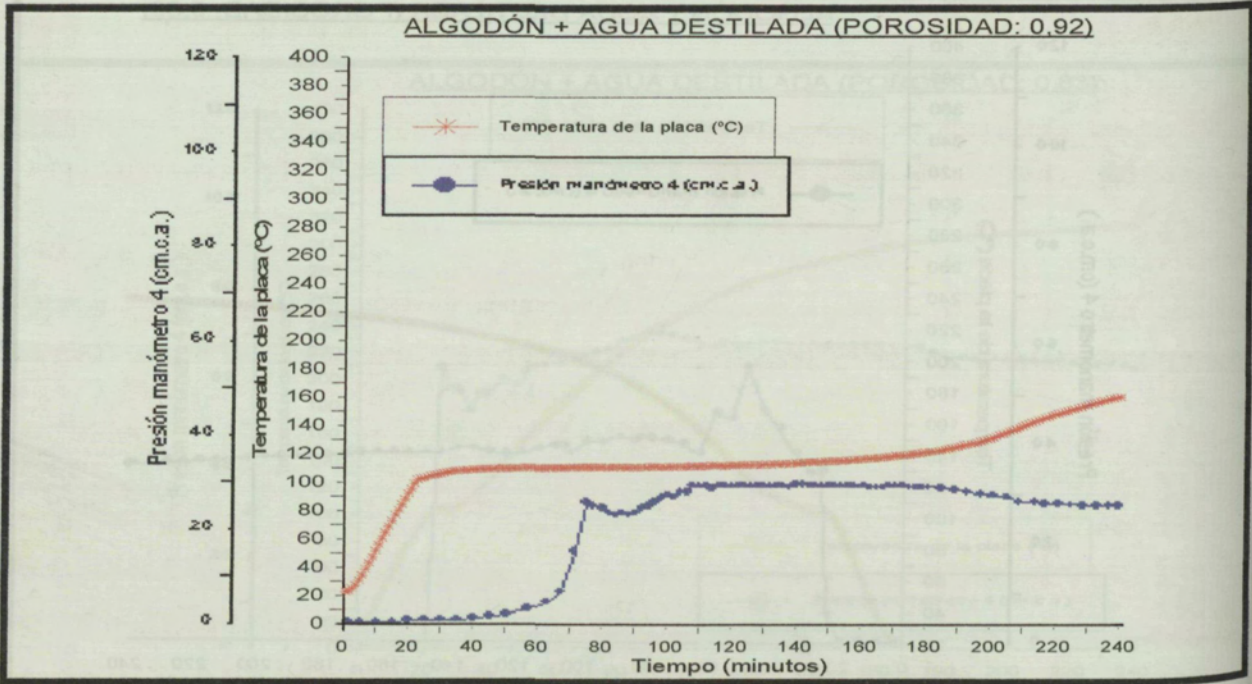


Figura 4.93.- Variación temporal de la temperatura de la placa calefactora y de la presión del fluido saturante en el punto  $z = 3,364$  cm y  $r = 0$  cm (piezómetro 4).



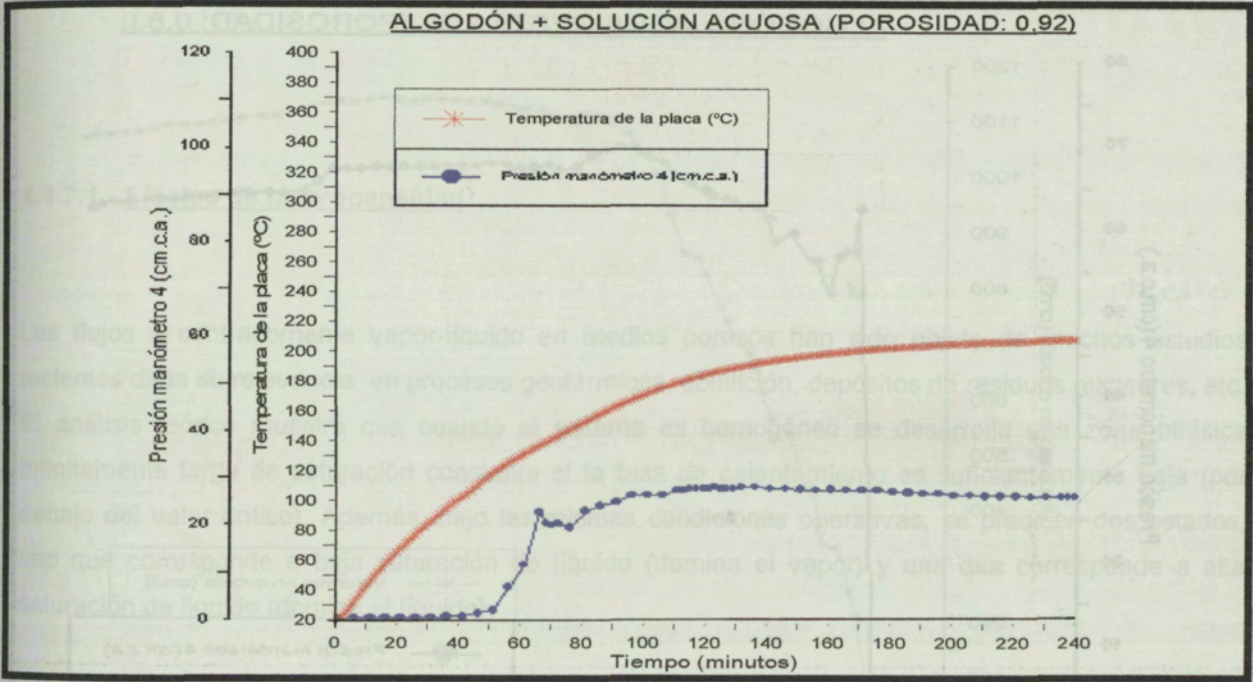


Figura 4.94.- Variación temporal de la temperatura de la placa calefactora y de la presión del fluido saturante en el punto  $z = 3,364$  cm y  $r = 0$  cm (piezómetro 4).

La figura 4.95 muestra, a título de ejemplo, la evolución de la presión detectada por el piezómetro nº 4 y la variación simultánea del volumen de líquido en la cubeta, en el transcurso del tiempo, correspondientes al medio poroso a base de algodón ( $\epsilon = 0,83$ ) saturado por agua destilada calentado por una potencia eléctrica aplicada de 300 W. Esta gráfica muestra claramente la correlación temperatura-presión de vapor-desplazamiento de líquido.



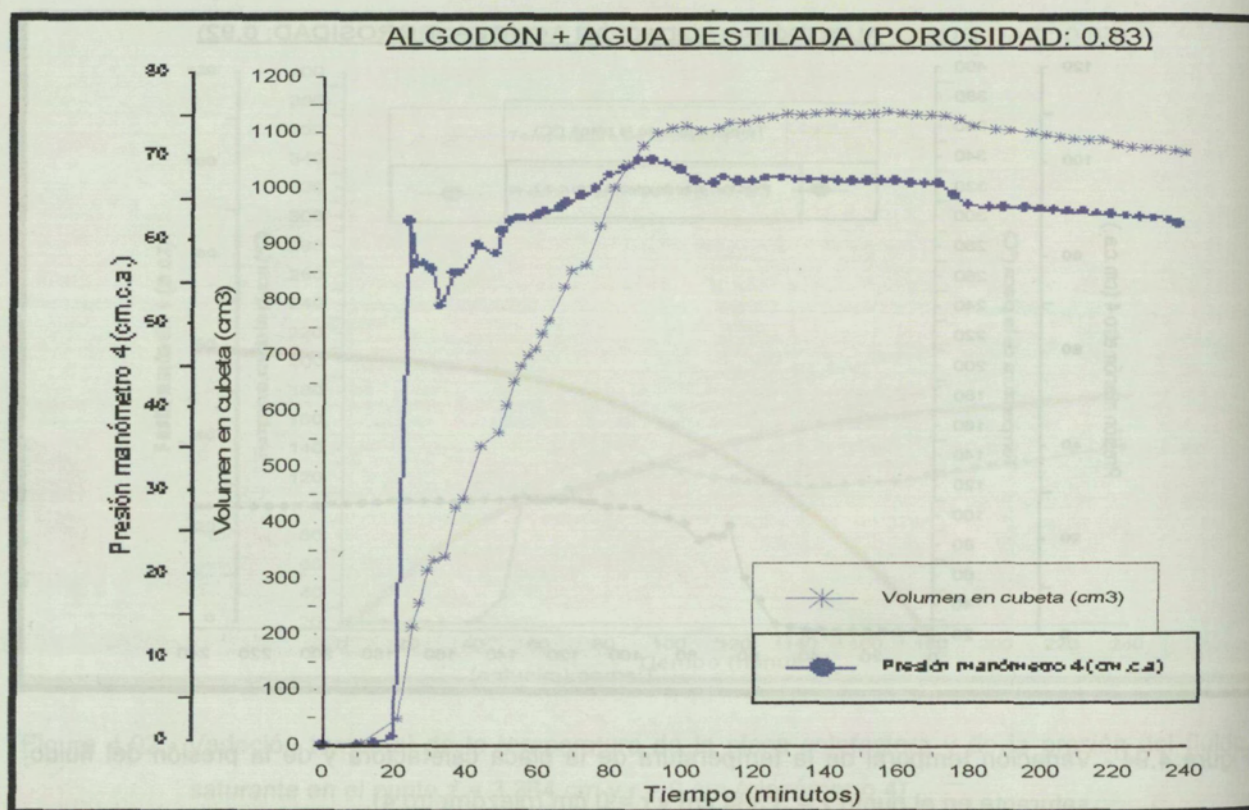


Figura 4.95.- Variación temporal de la presión (piezómetro 4) y del volumen de líquido en la cubeta.